

---

## MODELAREA SISTEMELOR DINAMICE

---

Sorin Dan ȘANDOR

*System Dynamics was introduced by Jay W. Forrester in the 1960s. Since then the methodology was adopted in many areas of natural or social sciences. The present article tries to present briefly how this methodology works, both as Systems Thinking and as Modelling with Vensim computer software.*

**Sorin Dan ȘANDOR**, lector univ. ing. în cadrul Catedrei de Administrație Publică, Facultatea de Științe Politice și Administrative a Universității „Babeș-Bolyai”, Cluj-Napoca.

### Introducere

Termenul de sociologie, un amestec de latină cu greacă, a fost propus de către Auguste Comte la mijlocul secolului XIX pentru știința societății. Acesta și-a divizat sistemul său ideatic în două părți, statistica și dinamica socială. În perioada care a trecut de atunci

studiile de statistică socială au ocupat primul loc (sondajele de opinie sunt un bun exemplu de cercetări statice, ele surprinzând realitatea socială în același mod în care un aparat fotografic surprinde o parte a realității fizice). În ceea ce privește dinamica socială (mult mai greu de studiat și, mai ales, de anticipat), cercetările sunt departe de ceea ce se dorește.

O posibilă direcție de cercetare a fost deschisă datorită apariției Teoriei Generale a Sistemelor, datorată lui Ludwig von Bertalanffy (1948). Jay W. Forrester, în *Dinamica Industrială* prezintă ideile de bază ale acestei teorii astfel:

- a) orice sistem este alcătuit din elemente (părți) interdependente, acționând în comun în virtutea unui scop;
- b) ansamblul legăturilor între elementele sistemului, precum și al legăturilor cu întregul, formează structura sistemului S;
- c) complexitatea sistemelor depinde mai mult de structura sistemului decât de natura părților sale;
- d) două sisteme cu structuri parțial identice se numesc homeomorfe (sistemul mai simplu va constitui un model al sistemului homeomorf mai complex);
- e) două sisteme homeomorfe vor avea un comportament asemănător, de unde rezultă posibilitatea de studiu a proprietăților sistemelor reale prin simulare;
- f) structura (statică) unui sistem preexistă comportamentului său (dinamicii sistemului);
- g) mișcările într-un sistem se realizează prin fluxuri presupuse concrete și continue;
- h) într-un organism economic toate categoriile de mișcări pot fi grupate în următoarele tipuri de fluxuri interconectate: 1) fluxuri materiale; 2) fluxuri de comenzi; 3) fluxuri bănești; 4) fluxuri umane; 5) fluxuri de echipamente și 6) fluxuri informaționale;
- i) fluxul informațional are un rol central în funcționarea sistemelor;
- j) procesele decizionale sunt considerate și ele ca având un rol central în mecanismul sistemelor; ele sunt presupuse a fi discontinue;
- k) reglarea este un element caracteristic al funcționării sistemelor;
- l) procesele care au loc în sistemele economice sunt, de regulă, neliniare.

Cibernetica (știință introdusă de Norbert Wiener, 1948) se ocupa inițial de sisteme de control și de comunicare a informației. Ea este importantă prin introducerea noțiunilor de homeostazie (adaptare) de legăturile dintre sistem și mediul înconjurător.

În timp s-a format o întregă școală de studiere a realității din punct de vedere al comportamentului sistemelor. Această abordare se regăsește mai ales în disciplinele economice sau ingineresti, dar poate fi extinsă în tot domeniul științelor sociale. Ansamblul societății poate fi considerat ca un sistem al cărui elemente componente (care pot fi privite la rândul lor ca sisteme conținând alte sisteme și așa mai

departe) sunt conectate prin fluxuri materiale și informaționale și au un comportament orientat spre atingerea unor scopuri precise.

O metodologie pentru analizarea sistemelor complexe a fost dezvoltată de Jay W. Forrester în anii 1960 la Școala Sloan de Management a M.I.T. Pentru a ajuta analiza sistemelor complexe astfel încât să includă toate relațiile cauză-efect relevante Forrester a creat *System Dynamics* (Dinamica sistemelor, mai cunoscută la noi sub numele de dinamica industrială – după titlul cărții lui Forrester – sau ca analiza sistemelor dinamice). Mai întâi aplicată în domeniul industrial, metodologia a putut fi folosită cu succes și în domenii ca economia, criminalitatea, sănătatea sau ecologia. În 1972, când pe baza SD au fost elaborate previziunile din *Limitele creșterii. Un raport către Clubul de la Roma*<sup>1</sup>, metodologia a părut că oferă un „glob de cristal cu ajutorul căruia să se poată prezice viitorul oricui”<sup>2</sup>, ceea ce este, fără îndoială, exagerat.

SD este o metodologie pentru studierea sistemelor complexe cu conexiune inversă (sau feed-back). Termenul de feed-back se referă la situația în care X influențează pe Y și invers, uneori prin intermediul unui lanț de cauze și efecte. Relația dintre X și Y nu poate fi studiată în mod direct, ci doar privind întregul sistem din care fac parte X și Y ca un sistem complex cu feed-back.

Caracteristicile acestei metodologii sunt:<sup>3</sup>

- Identifică o problemă;
- Elaborează o ipoteză dinamică explicând cauza problemei;
- Construiește un model computerizat de simulare a sistemului în chestiune;
- Testează modelul astfel încât să fie sigur că reproduce comportamentul din lumea reală;
- Construiește și testează în model politici alternative care rezolvă problema;
- Implementează soluția.

Rareori se întâmplă ca o analiză să treacă prin toți acești pași. Primii doi pași sunt identici cu cei întâlniți în analiza sistemică (*System Thinking*).

#### **Analiza sistemică**

Analiza sistemică se poate defini ca un mod de a gândi structura și procesele din interiorul unui sistem. Nu este un lucru simplu, presupunând gândirea la cel puțin „șapte nivele simultan: dinamic, în buclă închisă, generic, structural, operațional, continuu și științific”<sup>4</sup>.

Pentru a gândi un sistem trebuie să abandonăm gândirea tradițională. În loc să luăm în discuție evenimente izolate dintr-o organizație și posibilele lor cauze trebuie să privim organizația ca un sistem compus din părți care interacționează între ele. Gândirea bazată pe „un eveniment duce la altul” și care pot duce la stabilirea unui tip de comportament poate întâmpina mari probleme în momentul în care trebuie determinată cauza inițială. Adevărata cauză poate fi stabilită analizând structura internă a organizației, care poate fi adevărata cauză a evenimentelor. Tipul de comportament care caracterizează situația este determinat de structura internă.

Se disting patru tipuri de comportament:

- **Creștere exponențială**, în care avem de a face cu o creștere de la un nivel inițial cu o rată care crește la rândul ei;
- **Asimptotic sau Orientat spre un obiectiv**, în care din starea inițială se tinde (crescător sau descrescător) spre o anumită valoare;
- **În formă de S**, când o creștere inițial exponențială ajunge să se comporte asimptotic;
- **Oscilantă**, în care avem de a face cu oscilații în jurul unui anumit nivel.

Pentru a înțelege modul în care structura influențează comportamentul se folosesc bucle cauzale sau de feed-back, adică o secvență închisă<sup>5</sup> de cauze și efecte, de acțiune și informație. Ideea centrală a metodei este că structurile de feed-back ale unui sistem pot fi cauzele unui tip de comportament.

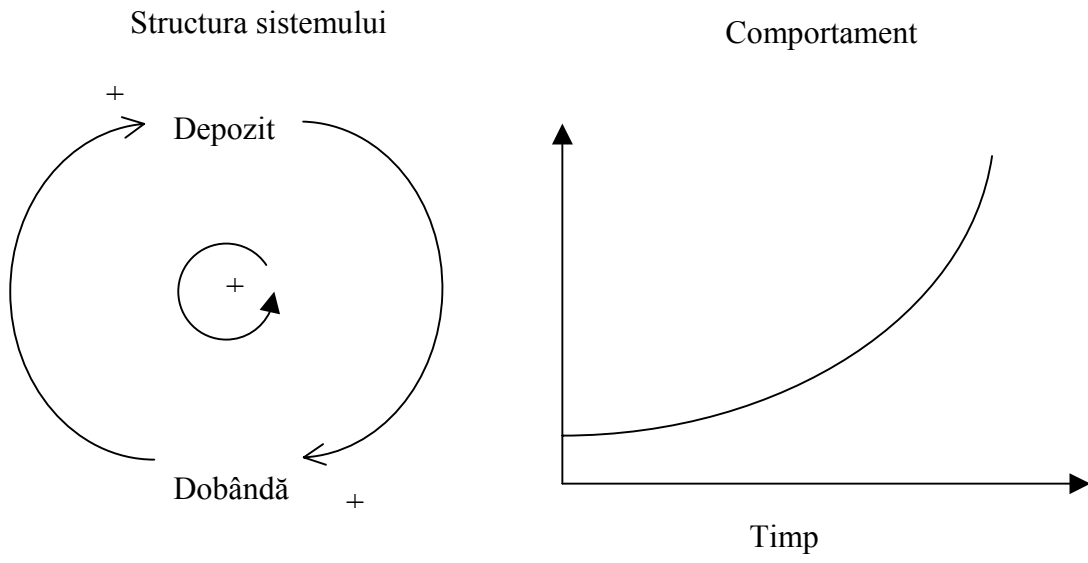
<sup>1</sup> Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III., *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, 1972.

<sup>2</sup> Donella H. Meadows, *System Dynamics Meets the Press*, în *The Global Citizen*, Island Press, 1991, p. 2.

<sup>3</sup> System Dynamics Society, [www.systemdynamics.org](http://www.systemdynamics.org).

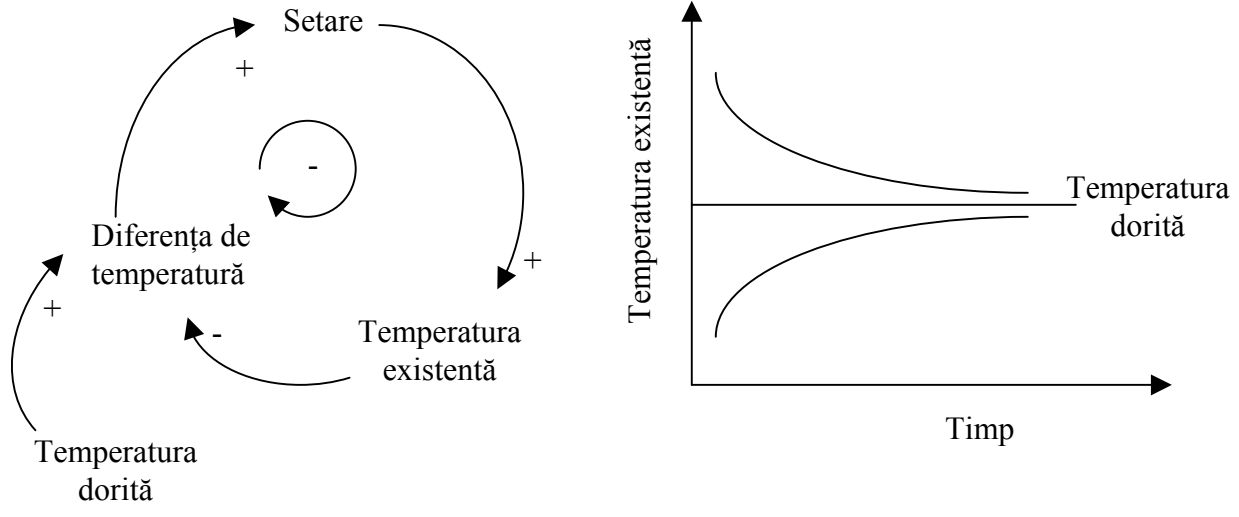
<sup>4</sup> Barry Richmond, *Systems Thinking: Critical Thinking Skills for the 1990s and Beyond* în: *System Dynamics Review*, Vol. 9, no. 2 (Summer 1993), p. 121.

Sistemele sunt reprezentate prin diagrame cauzale care ne prezintă elementele și relațiile dintre ele. Relațiile pot fi pozitive (o modificare într-un element produce o modificare în același sens în celălalt sau unul se adaugă la celălalt) sau negative (în caz contrar). Dacă într-o buclă avem un număr par de relații pozitive vom vorbi despre o buclă pozitivă, iar dacă avem un număr impar vorbim de o buclă negativă.



În cazul unui depozit bancar cu dobândă capitalizată avem de a face cu o buclă pozitivă. Dobânda se adaugă la depozit, deci avem o relație pozitivă. Pe măsură ce crește depozitul crește și dobânda primită în fiecare lună, deci din nou vorbim de o relație pozitivă. Se poate observa și comportamentul sistemului: este unul de tip exponențial, dat tocmai de structură.

Pentru un comportament asimptotic un exemplu ar putea fi dat de reglarea temperaturii dintr-o cameră de hotel: avem de a face cu o temperatură dorită, o setare a aparatului de aer condiționat, temperatura existentă și diferența de temperatură existentă.



Bucula este una negativă, ceva tipic pentru sistemele cu un nivel de echilibru (în cazul prezentat, temperatura dorită). Pentru un sistem cu un comportament oscilant putem avea aceeași situație a temperaturii din cameră, dar presupunând că perceperea temperaturii ne ia mai mult timp. Datorită întârzierii vom fi siliți să apelăm la butonul de reglare a aerului condiționat astfel încât temperatura din cameră va oscila în jurul temperaturii dorite.

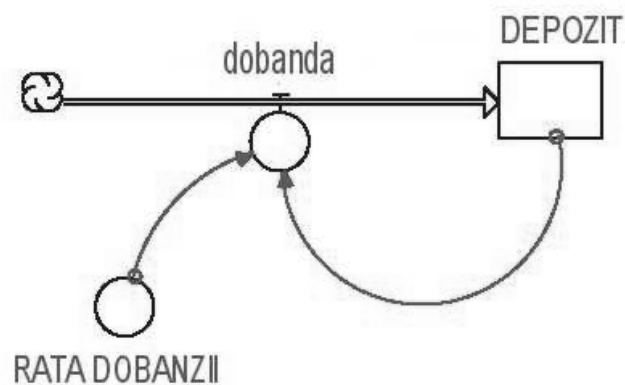
<sup>5</sup> Este important să reținem că avem de a face cu o structură sau o buclă închisă. O structură deschisă cum ar fi un lanț cauzal este considerată liniară și prea puțin capabilă să descrie complexitatea sistemului.

O diagramă cauzală poate conține mai multe bucle, ele influențându-se reciproc. Dacă luăm cazul introducerii unui nou produs pe piață s-ar putea să avem două bucle: una pozitivă (în care creșterea vânzărilor determină creșterea veniturilor angajaților, care determină o mai bună motivație, care determină la rândul lor creșterea vânzărilor) și una negativă (în care creșterea vânzărilor determină creșterea cotei de piață, dar care este limitată, ceea ce duce în final la o stagnare a vânzărilor), rezultatul final fiind un comportament în formă de S.

Pentru a realiza o diagramă cauzală trebuie mai întâi decis ce evenimente ar fi de interes, mai apoi văzut care este tipul de comportament în timp al variabilelor implicate în aceste evenimente și mai apoi se ajunge la construirea unei diagrame cauzale care să explice comportamentul observat.

### Modelarea dinamicii sistemului

Pentru a modela un sistem dinamic este nevoie de un alt tip de diagramă numită Stock and Flow (S&F). Avem aici de a face cu trei elemente: **stock** (nivel, acumularea a ceva), **flows** (mișcările de la o acumulare la alta) și informații despre modul în care situația evoluează.



Am reprezentat aici cazul unui depozit cu dobândă capitalizată (mai sus era prezentată sub forma diagramei cauzale).

În cazul unei diagrame S&F cu dreptunghiuri sunt reprezentate variabilele, cu două linii paralele încheiate cu o săgeată sunt reprezentate mișcările.

Pentru modelare se folosesc programe de calculator special elaborate. La această oră cel mai apreciat este Vensim, care este poate fi descărcat gratuit de la adresa [www.vensim.com](http://www.vensim.com) într-o variantă simplificată.

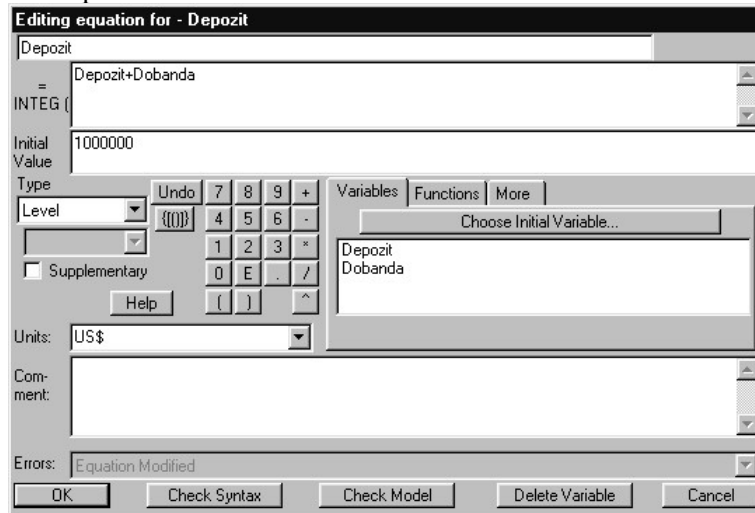
Cu ajutorul Vensim modelarea este foarte simplă. După ce am stabilit cadrul de timp (momentul inițial, momentul final și pasul), trecem la construirea unei diagrame S&F. În fereastra programului avem o bară cu instrumente cu ajutorul căreia putem insera variabile auxiliare, variabile de tip nivel, săgeți (reprezentând relații), fluxuri (**flow**, denumite aici **rate**), variabile ascunse, comentarii, să ștergem anumite elemente și să introducem ecuații.

Diagrama capitalizării dobânzii cuprinde o variabilă de tip nivel: **Depozit** și o variabilă de tip auxiliar (**Rata dobânzii**). Pentru a introduce mișcarea (care reprezintă adăugarea dobânzii la depozit) se lucrează foarte simplu: după ce am selectat instrumentul **Rate** ajunge un click pentru a defini originea și încă unul pe **Depozit** pentru a ști unde se face acumularea, după care scriem și denumirea (**Dobânda**). Mai trebuie realizate și relațiile dintre **Depozit** și **Dobânda** și între **Dobânda** și **Rata Dobânzii**. Acestea se fac selectând instrumentul **Arrow** și dând click pe variabile în ordinea dorită (pentru prima relație mai întâi pe **Depozit** și mai apoi pe **Dobânda**).

După ce am construit diagrama rămâne să definim ecuațiile. Să presupunem că dorim să introducem ecuația pentru valoarea depozitului. Ecuația este **Depozit=Depozit+Dobânda**, arătând că în fiecare an la depozit de adaugă o anumită sumă. Trebuie să fixăm și valoarea inițială a depozitului (să spunem 1 milion) și să specificăm unitatea de măsură (US\$).

După ce selectăm instrumentul **Equations** și un click pe variabila care ne interesează (**Depozit**, de exemplu) intrăm în fereastra de editare a ecuației.

Pentru variabilele de tip nivel aceasta arată astfel:



Avem posibilitatea să lucrăm doar cu ajutorul mouse-ului. Putem verifica dacă avem sintaxă corectă sau dacă modelul este corect, programul afișând în permanență starea ecuației (în dreptul lui **Errors**).

După ce am construit toate ecuațiile nu ne rămâne decât să rulăm o simulare, după care putem vedea ori grafic, ori sub forma unor tabele modul în care a evoluat variabila dorită.

### Concluzii

În cele de mai sus am încercat o prezentare schematică a modului în care se poate face o analiză a sistemelor dinamice. Acest articol și-a propus doar să convingă că această metodologie nu este una esoterică, rezervată unei elite. Modelarea matematică poate părea complicată pentru cei care urăsc matematica (ceea ce este cazul prea multora dintre cei care au absolvit licee umaniste în România). Analiza sistemică este, însă, la îndemâna fiecăruia, putând fi folosită pentru a analiza sisteme de o complexitate cât mai mare.

Inițiatorul SD o propune chiar pentru învățare în tot sistemul educațional, de la grădiniță până la liceu. În opinia lui Forrester SD „permite răsturnarea secvenței educaționale tradiționale în care ani plictisitori de învățare a unor fapte au precedat utilizarea acelor fapte prin introducerea sintezei (...) într-un stadiu timpuriu al experienței elevului”<sup>6</sup>. Accentul pus pe sinteză este ceva nou într-un sistem educațional în care elevii poate învăță să analizeze (adică să descompună sistemele în elementele componente), dar prea rareori să și încerce să pună toate componentele la loc (sinteza).

Situația nu este prea diferită în domeniul științei, mai ales a științelor sociale, în care principala preocupare este cea de a măsura diferiți indicatori, nu de a vedea care în ce mod merge lumea.

### Bibliografie

1. Forrester, Jay W, *Dinamica industrială*, Ed. Tehnică, 1981.
2. Forrester, Jay W, *System Dynamics and Learner-Centered-Learning in Kindergarten through 12th Grade Education*, MIT, 1992.
3. Forrester, Jay W (coord.), *Road Maps. A Guide to Learn System Dynamics*, <http://sysdyn.mit.edu>, 1992.
4. Meadows, Donella H, Meadows., Dennis L., Randers, Jorgen, Behrens, William W. III., *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, 1972.
5. Meadows, Donella H., *System Dynamics Meets the Press*, în *The Global Citizen*, Island Press, 1991.
6. Richardson, George P., Pugh III, Alexander L., *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*, Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
7. Richmond, Barry, *Systems Thinking: Critical Thinking Skills for the 1990s and Beyond* în: *System Dynamics Review*, Vol. 9, no. 2 (Summer 1993).
8. System Dynamics Society, [www.systemdynamics.org](http://www.systemdynamics.org)

<sup>6</sup> Jay W. Forrester, *System Dynamics and Learner-Centered-Learning in Kindergarten through 12th Grade Education*, MIT, 1992, p. 1.